

Erschütterungsmessung im Bauwesen

Theorie und Praxis

1 Einleitung

Schwingungs- oder Erschütterungsmessungen haben im Bauwesen in den letzten Jahrzehnten eine sehr grosse Bedeutung erlangt. Dank den grossen Fortschritten in der Sensortechnologie und in den Analysewerkzeugen ist der Einsatz von Erschütterungsmessgeräten einerseits stark vereinfacht worden, gleichzeitig sind die dabei erzielbaren Ergebnisse enorm verbessert worden. Der vorliegende Beitrag soll dem Bauingenieur eine Einführung in die Sensortechnologie geben und ihn vertraut machen mit den wichtigsten Auswerteverfahren, soweit sie bei Messungen im Bauwesen von Bedeutung sind. Darnach wird anhand von acht typischen Anwendungen im Bauwesen aufgezeigt, welche Sensoren sinnvollerweise eingesetzt werden und welche Probleme bei solchen Messungen auftauchen können.

2 Sensoren

Die Hilfsmittel zur Bestimmung der drei Grössen *Geschwindigkeit*, *Beschleunigung* und *Weg* sind elektro-mechanische Wunderwerke, die uns erlauben, die gewünschten Messgrössen mit fast unglaublicher Präzision zu ermitteln. Um die Anwendungsmöglichkeiten richtig einschätzen zu können und vor allem um die Grenzen der Anwendbarkeit zu erkennen, ist ein gewisses Grundverständnis der Funktionsprinzipien von Vorteil. Im Folgenden sollen für jede Messgrösse ein Beispiel eines Messaufnehmers, sein Funktionsprinzip und seine Anwendungsmöglichkeiten kurz beschrieben werden.

2.1 Geschwindigkeits-Sensor

Bild 2.1 zeigt den triaxialen Geschwindigkeitssensor MS2003⁺ von SYSCOM. Im Gehäuse befinden sich drei Geophone und die zugehörige Elektronik, die uns erlaubt, Schwingungen von weniger als 0.000004 mm/s zu messen. Das Prinzip des Geophons ist dem eines Fahrraddynamos nicht unähnlich. Der Dynamo dreht sich in einem Magnetfeld und je schneller er dreht, umso mehr Strom produziert er. Die Spule des Geophons (vgl. Bild 2.2a) bewegt sich ebenfalls in einem Magnetfeld - allerdings linear - und je schneller sie sich bewegt, umso grösser ist die abgegebene Spannung. Die Spule ist an einer Feder aufgehängt und bewegt sich wie ein Ein-Massen-Schwinger d.h. mit der üblichen Überhöhung bei der Eigenfrequenz (rote Linie in Bild 2.2a). Oberhalb der doppelten Eigenfrequenz bewegt sich die Masse – wegen ihrer Trägheit – praktisch nicht mehr und die Relativbewegung zwischen Masse und Gehäuse entspricht der zu messenden Erschütterung. Unterhalb der halben Eigenfrequenz bewegt sich die Masse praktisch gleich wie das Gehäuse und bei sehr tiefen Frequenzen von unter 0.1 Hz existiert praktisch keine Relativbewegung zwischen Masse und Gehäuse. Dementsprechend wird dann auch keine Schwingung mehr gemessen. Die eingebaute Elektronik ist



Bild 2.1 Sensor MS2003⁺ von SYSCOM

dafür besorgt, dass das gemessene Signal im interessierenden Bereich linearisiert wird (blaue Linie in Bild 2.2a). Beim Sensor MS2003⁺ reicht die Linearisierung bis auf 1 Hz hinunter.

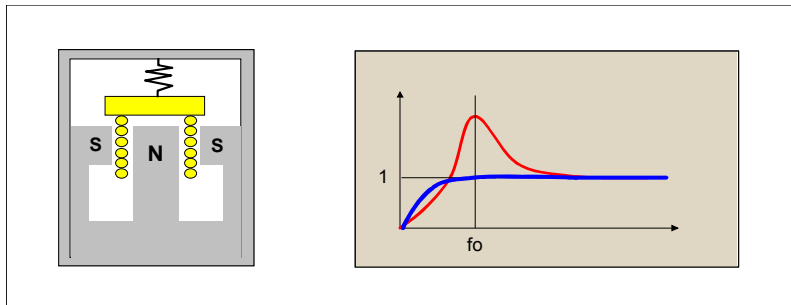


Bild 2.2a Funktionsprinzip des Geophons

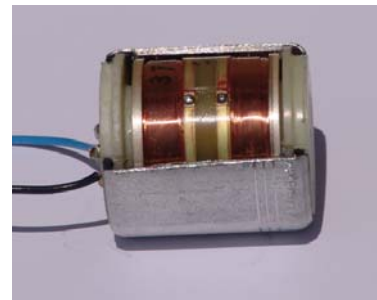


Bild 2.2b Messzelle

Die Einsatzmöglichkeiten des Geschwindigkeitssensors nach dem Geophon-Prinzip werden weitgehend durch seinen Messbereich (Amplitude und Frequenz) und durch sein Funktionsprinzip bestimmt. Beim MS2003⁺ reicht der Amplitudenbereich von 0.000004 mm/s bis 115 mm/s und der Frequenzbereich von 1 Hz bis 315 Hz. Zu beachten ist, dass ein Geophon im tieffrequenten Bereich, wegen der beschränkten Relativbewegung zwischen elastisch aufgehängter Masse und Gehäuse, eine reduzierte maximale Schwinggeschwindigkeit aufweist.

Mit dem Geschwindigkeitssensor MS2003 lassen sich die meisten Messaufgaben im Bereich der Bauwerksdynamik bewältigen. Nicht geeignet ist er allerdings bei Schwingungen mit tiefen Frequenzen (d.h. unter 1 Hz.), bei Schwingungen mit grösseren Amplituden (d.h. grösser 1 mm) und bei Bewegungen mit bleibenden Verschiebungen.

2.2 Beschleunigungs-Sensor

Die Bilder 2.3a bis f zeigen den Beschleunigungssensor MS2004⁺ von SYSCOM und sein Funktionsprinzip. Als Gedankenmodell wählen wir die Waage von Bild 2.3b. Eine Beschleunigung nach oben würde die Masse rechts nach unten ziehen und der Zeiger würde nach links ausschlagen. Dies wird allerdings durch eine Kraft mittels aufgebrachtener Spannung korrigiert, sodass die Waage stets in der Nullposition bleibt. Die aufzubringende Spannung ist somit proportional zur Beschleunigung. Diese Bauweise erlaubt eine extreme Miniaturisierung, wie in Bild 2.3c dargestellt. In der Realität wird die Masse durch ein dünnes Plättchen (Bild 2.3e) verkörpert, die Feder durch feine Biegestäbchen und die Wegmessung wird durch das Kondensatorenprinzip realisiert.

Im Gegensatz zum Geschwindigkeitssensor lassen sich mit diesem Beschleunigungssensor auch sehr tiefe Frequenzen messen. Denn seine Frequenzganglinie ist konstant bis auf Null Hertz (siehe Bild 2.3f). Allerdings ist der Beschleunigungssensor im tiefen Frequenzbereich nicht so empfindlich wie der Geschwindigkeitssensor.

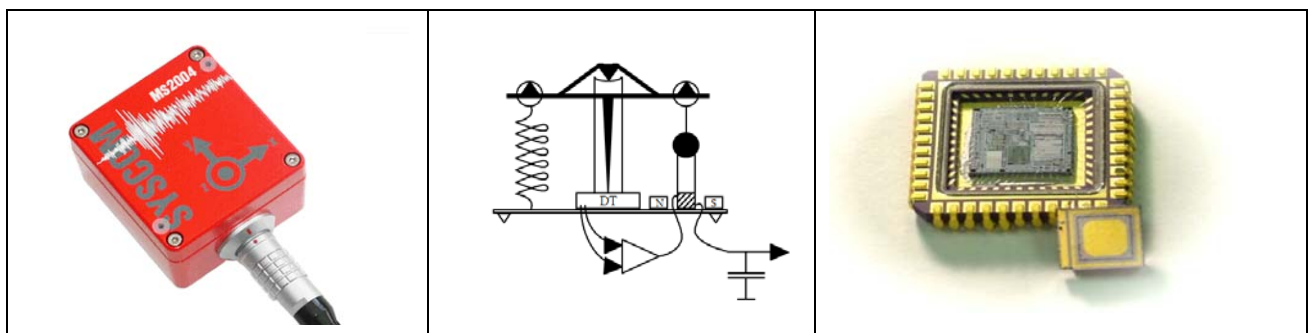


Bild 2.3a Sensor MS2004⁺

Bild 2.3b Funktionsprinzip FBA

Bild 2.3c Messzelle des MS2004⁺

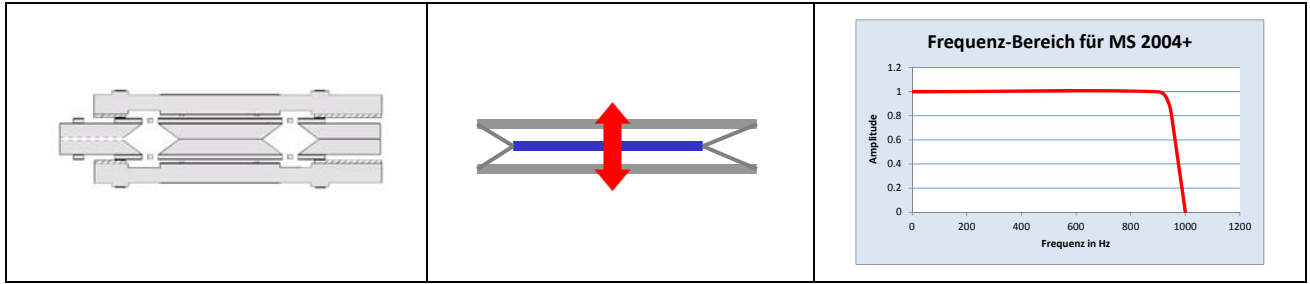


Bild 2.3d Schnitt durch Messzelle

Bild 2.3e Messzelle schematisch

Bild 2.3f Frequenzgang

2.3 Weg-Sensor

Die direkte Messung des Schwingweges bietet oft grössere Schwierigkeiten als die Messung der Beschleunigung oder der Geschwindigkeit, denn bei der Messung des Schwingweges ist ein ruhender Referenzpunkt erforderlich. Für die Messung der Durchbiegung einer Brücke z.B. ist eine mechanische oder optische Verbindung mit dem Boden unter der Brückenmitte nötig, was bei einer Flussbrücke nicht ohne weiteres machbar ist.

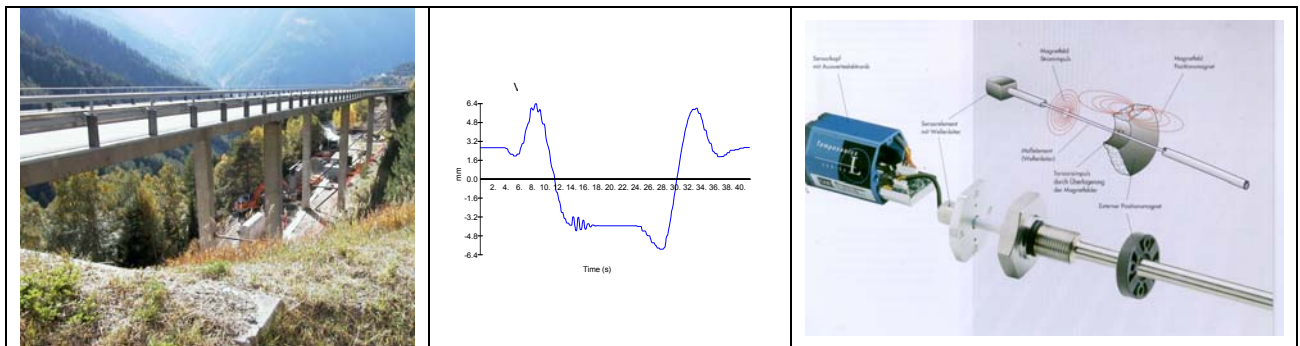


Bild 2.4 Brücke am Simplon mit Aufzeichnung der Durchbiegung bei der Durchfahrt eines Lastwagens

Bild 2.5 Funktionsprinzip des magnetostruktiven Wegsensors

Bei der Brücke in Bild 2.4 wurde die Einsenkung in Feldmitte mit einem magnetostruktiven Wegsensor aufgezeichnet. Der Sensor selbst war auf einem Stativ auf der Strasse unter der Brücke montiert, der Weggeber hing an einer 30 m langen Kette. Die Messgenauigkeit liegt im Bereich von 0.004 mm. Die Aufzeichnung in Bild 2.4 zeigt das Anheben des Brückenfeldes bei der Befahrung des Nachbarfeldes (6 s bis 11 s) und die Einsenkung während des Befahrens des Messfeldes. Im Zeitraum von 17 s bis 25 s war der Lastwagen parkiert. Beim Wegfahren ergab sich eine zusätzliche Einsenkung und dann wieder ein Anheben während der Befahrung des Nachbarfeldes.

Bild 2.5 zeigt schematisch das Arbeitsprinzip des magnetostruktiven Wegsensors: Durch ein Messelement (Stab) wird ein Stromimpuls geschickt, der ein Magnetfeld verursacht. Gleichzeitig befindet sich an einer bestimmten Stelle des Messelementes ein Positionsmagnet mit seinem eigenen Feld. Die Positionsbestimmung erfolgt durch Laufzeitmessung. Typische Anwendungsmöglichkeiten dieses Sensors sind Einsenkungen von Brücken oder dynamische Rissöffnungs-Messungen.

2.4 Messbereiche und Empfindlichkeit

Offensichtlich gibt es nicht *einen richtigen* Sensor, der für alle Anwendungen geeignet ist, sondern wir müssen uns vor jeder Messung überlegen, welche Grösse wir primär messen wollen und in welchem Amplituden- und Frequenzbereich sich die zu messende Schwingung bewegt. Bild 2.6 zeigt die Messbereiche der beiden Sensoren MS2003⁺ (Geschwindigkeit) und 2004⁺ (Beschleunigung) von SYSCOM. Mit diesen beiden Sensoren lassen sich praktisch alle Messaufgaben im Bereich der Bauwerksdynamik bewältigen.

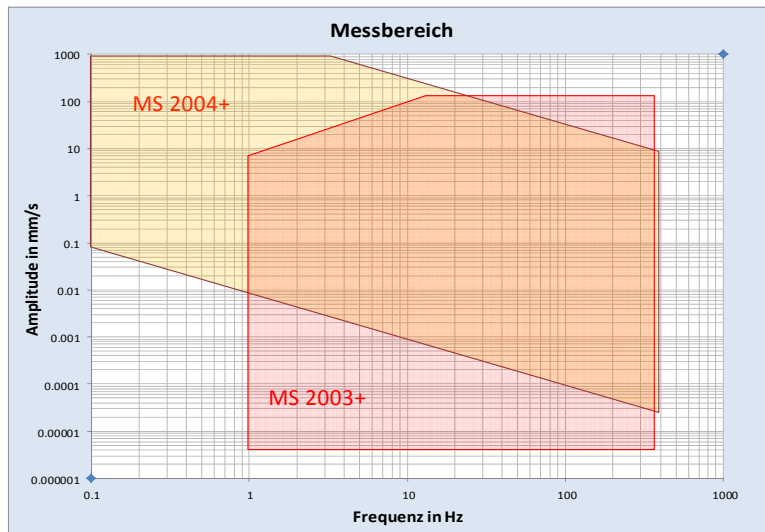


Bild 2.6 Vergleich der Messbereiche für Geschwindigkeitssensor MS 2003+ und für Beschleunigungssensor MS2004+

3 Digitale Signalverarbeitung

Wenn wir Erschütterungsmessungen durchführen, durchlaufen die Messdaten – ohne dass wir davon speziell Kenntnis nehmen – einen komplizierten Weg von der Erschütterung am Messort bis zur Darstellung der Messdaten im Messbericht. Die genaue Kenntnis der dabei ablaufenden Vorgänge ist für die Messung zwar nicht unbedingt erforderlich, doch hilft sie, Messungen optimal durchzuführen.

3.1 Die Messkette am Beispiel des MR 2002 CE

Unsere Messkette besteht aus den Komponenten Schwingungssensor, Schwingungsrecorder und PC. Für unsere nachfolgenden Betrachtungen ist allerdings eine andere Aufteilung, nämlich die Aufteilung in einen *analogen* und in einen *digitalen* Teil von noch grösserer Bedeutung.

| Messkette beim MR2002 | | | | |
|--|------------------------|--|-----------------------|-----------------------------|
| Sensor | Motion Recorder MR2002 | | | PC mit VIEW2002 |
| <i>Analog</i> | <i>Analoger Teil</i> | | <i>Digitaler Teil</i> | <i>Digital</i> |
| MS2003 ⁺ (v) MS2004 ⁺ (a) | Filter Verstärker | | Speichern u.v.a.m. | Frequenzanalyse u.v.a.m. |
| Analoger Teil | | | Digitale Teil | |

Bild 3.1 Erschütterungsmesskette am Beispiel des MR2002

Im analogen Teil existieren die gemessenen Schwingungen als kontinuierliche Signale z.B. in Form von zeitlich veränderlichen Spannungen. Im digitalen Teil sind die Schwingungen diskretisiert, d.h. sie existieren als Zahlenreihen. In regelmässigen Zeitintervallen wird bei der Digitalisierung der momentane Wert der Spannung in eine Zahl umgewandelt und abgespeichert, wodurch die erwähnten Zahlenreihen als Ersatz des kontinuierlichen Spannungssignals entstehen. Die beiden Bereiche, d.h. der analoge und der digitale Bereich, sind sozusagen zwei verschiedene Welten. In jedem Bereich gelten bestimmte Gesetzmässigkeiten und es existieren auch spezifische Fehlerquellen. In jedem Bereich sind bestimmte Aufgaben bei der Signalverarbeitung durchzuführen und was man im analogen Bereich versäumt hat, kann man nicht einfach im digitalen Bereich nachholen.

3.1.1 Der analoge Teil

Der analoge Teil umfasst den Erschütterungssensor, die analoge Signalaufbereitung und natürlich das Kabel dazwischen. Wir gehen einmal davon aus, dass der Sensor ein korrektes, der Schwinggeschwindigkeit proportionales Spannungssignal abgibt. Das Spannungssignal wird über das Sensorkabel zum Recorder geleitet. Und hier können schon die ersten Fehler auftreten: Analoge Signale – speziell in langen Kabeln – können durch elektromagnetische Einflüsse verändert werden. Bei digitalen Signalen existiert dieses Problem nicht. Deshalb soll das Sensorkabel immer möglichst kurz gewählt werden.

Kommt das analoge Signal – hoffentlich unverfälscht – beim Recorder an, so darf es noch nicht direkt digitalisiert werden, sondern muss zuerst durch den sogenannten Signal-Conditioner aufbereitet werden. Dazu gehören im Allgemeinen zwei Schritte:

- die Tiefpassfilterung mit dem sog. Anti-Aliasing-Filter und
- die Verstärkung (falls erforderlich)

Diese beiden Schritte müssen im analogen Teil vorgenommen werden und können nicht später im digitalen Teil nachgeholt werden.

Das Anti-Aliasing-Filter ist ein Tiefpassfilter, das nur die Frequenzen unterhalb der halben Abtastrate des AD-Wandlers passieren lässt. Beim MR2002 z.B. hat das Anti-Aliasing-Filter für eine Abtastrate von 400 s/s (Messwerte pro Sekunde) eine Eckfrequenz von 156 Hz, bei 800 s/s eine solche von 315 Hz.

3.1.2 Der digitale Teil

Die Schnittstelle zwischen dem analogen und dem digitalen Teil bildet der Analog-Digital-Wandler, kurz AD-Wandler genannt. Er berechnet in regelmässigen Zeitintervallen, z.B. jede Millisekunde, aus dem momentanen Spannungswert eine entsprechende Zahl. Dabei werden, um die erforderlichen hohen Geschwindigkeiten zu erreichen, nur ganzzahlige Werte (Integer) verwendet. Der 20-Bit AD-Wandler im MR2002 teilt den Messbereich von -4 V bis $+4$ V auf in 2^{20} d.h. in 1'048'576 Intervalle ein.

Der kleinste Schritt umfasst dadurch eine Intervallgrösse von 0.0002 mm/s (mit High-Gain-Option sogar 0.000004 mm/s). Im MR2002 werden die Messdaten allerdings als Zahlenreihen mit Zahlen zwischen 0 und 1'048'576 abgespeichert. Erst die anschliessende Signalverarbeitung im Programm WINCOM oder im VIEW2002 werden daraus wieder mm/s oder mm/s² machen.

Der letzte Schritt im Messablauf ist die Datenauswertung z.B. mit dem Programm VIEW2002. Hier werden Rechenverfahren wie digitale Frequenzanalyse, digitale Filter usw. verwendet. Und hier kann eine gewisse Kenntnis der Hintergründe der digitalen Signalverarbeitung von Vorteil sein. Im Folgenden sollen diejenigen Aspekte der digitalen Signalverarbeitung dargestellt werden, die im Zusammenhang mit der Auswertung von Erschütterungsmessungen im Bauwesen von Bedeutung sind.

3.2 Auswertung im Zeitbereich

Bei der Auswertung im Zeitbereich wird das Signal als Zeitreihe belassen, d.h. das Signal bleibt eine Funktion der Zeit. Im Gegensatz dazu wird bei der Auswertung im Frequenzbereich, wie sie im Kapitel 3.3 behandelt wird, das Signal durch Transformation in den Frequenzbereich umgewandelt, so dass das Signal als Funktion der Frequenz betrachtet werden kann.

Die wohl wichtigsten Auswertungen im Zeitbereich sind:

- Maximalwert
- Gleitende Mittelwerte
- Integration
- Differentiation

Im Allgemeinen stellen diese Auswertungen keine besonderen Probleme, weshalb sie hier nur kurz besprochen werden sollen.

3.2.1 Maximalwerte und gleitende Mittelwerte

Maximalwerte lassen sich bei digitalen Signalen sehr einfach bestimmen, vorausgesetzt, dass die Null-Linie bekannt ist. Oft behilft man sich mit einer einfachen Null-Linien-Korrektur, bei der z.B. angenommen wird, dass der Mittelwert des gesamten Signals dem Nullwert entspricht.

Gleitende Mittelwerte werden für die in manchen Normen vorgeschriebenen Effektivwert-Bestimmungen verwendet. Dabei wird, wie in Bild 3.2 dargestellt, ein Zeitfenster der Länge T (= N/Abtastrate) mit einer bestimmten Gewichtungsfunktion w gebildet.

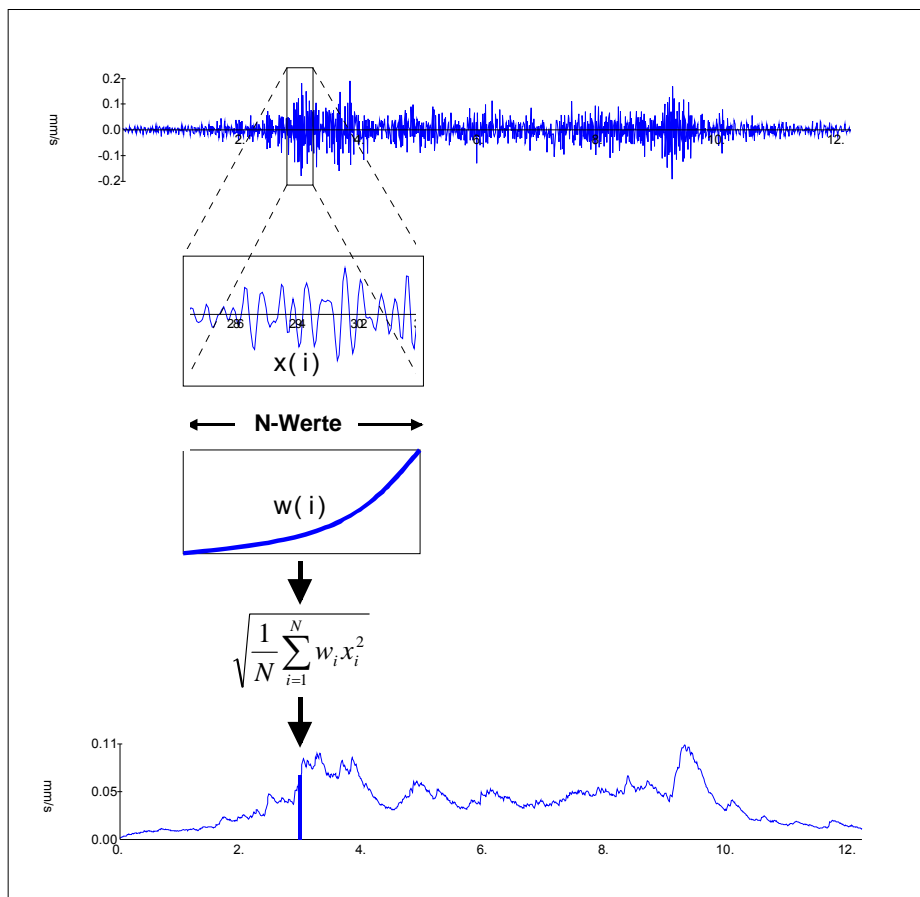


Bild 3.2 Berechnung des Effektivwertes als „Gleitender Mittelwert“

Alle Werte des Signals innerhalb des Zeitfensters werden nun quadriert, mit der Gewichtungsfunktion $w(i)$ multipliziert und schliesslich gemittelt. Durch sukzessives Verschieben des Fensters um jeweils einen Zeitschritt Δt entsteht ein neues Signal, der sogenannte „Gleitende Mittelwert“ oder „Gleitende Effektivwert“.

Zwei Fenstertypen trifft man häufig in den Normen, das Rechteckfenster und das Exponentialfenster. Bild 3.3 zeigt diese beiden Fenstertypen, angewendet auf eine Schwinggeschwindigkeitsaufzeichnung bei einer Zugvorbeifahrt. Wird bei beiden Fenstertypen die Zeitkonstante gleich gewählt, so ist die Fläche in den beiden Fenstern gleich gross und deshalb ergeben die beiden Verfahren bei harmonischen Signalen die gleichen Ergebnisse. Bei realen Signalen erge-

ben sich, wie man im Beispiel von Bild 3.3 sieht, Abweichungen in der Grössenordnung von 5 bis 10 %.

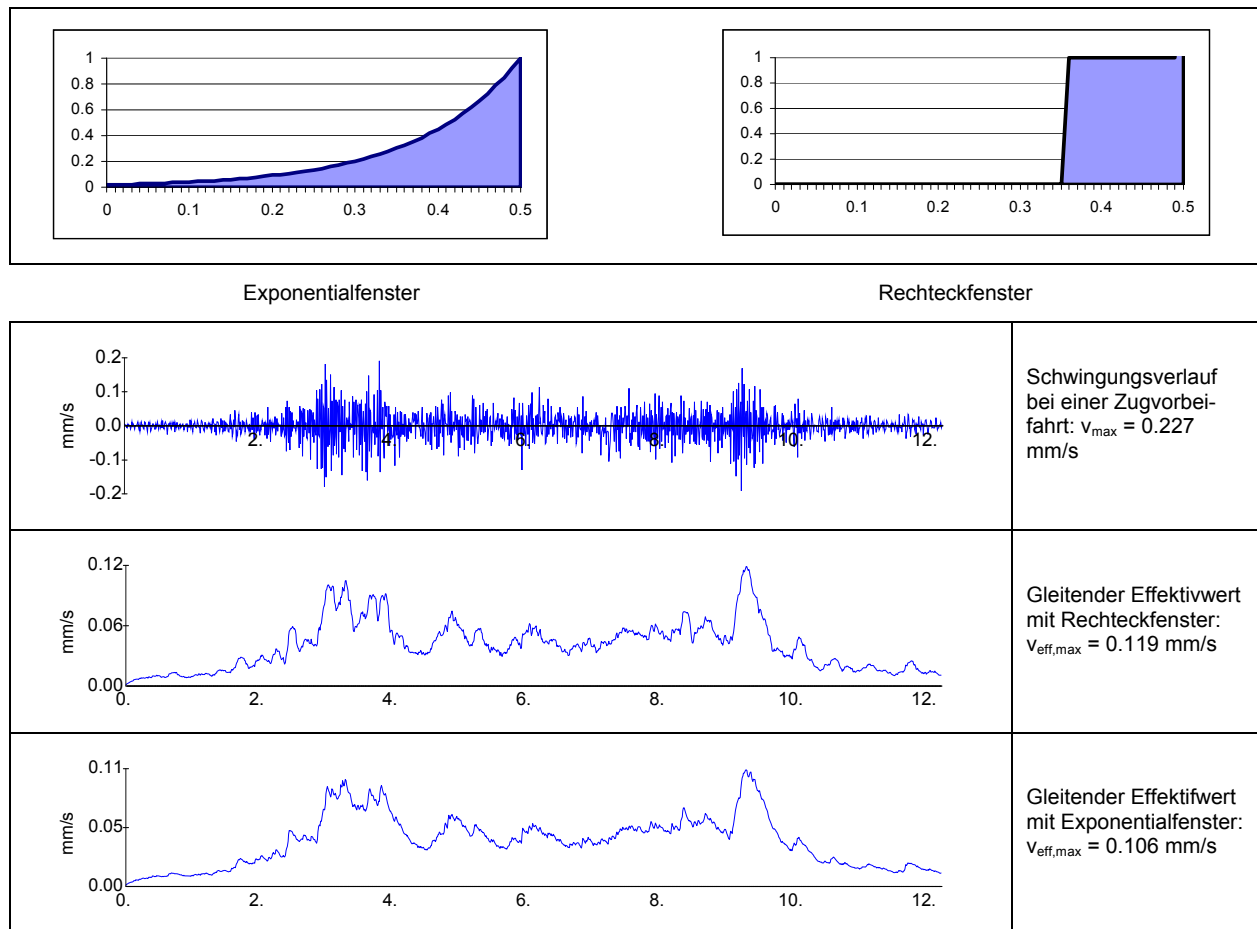


Bild 3.3 Vergleich des gleitenden Mittelwertes mit Rechteckfenster und mit Exponentialfenster.

Im Ergebnis unterscheiden sich die beiden Fenstertypen somit nur unwesentlich, hingegen ist der Rechenaufwand für das Exponentialfenster wesentlich geringer, da hier ein rekursiver Algorithmus verwendet werden kann.

3.2.2 Integration

Durch Integration des Geschwindigkeitssignals erhalten wir das Weg-Signal, d.h. die Verschiebung in Funktion der Zeit. An sich wirft diese Operation keine Probleme auf, wenn nicht dieses Nulllinien-Problem wäre. Besonders bei sehr kleinen Schwingungsamplituden kann sich der - immer vorhandene - Nulllinien-Fehler durch Integration derart verstärken, dass das interessierende Signal kaum mehr sichtbar ist. Besonders kritisch wird es, wenn man versucht, aus dem Beschleunigungssignal durch doppelte Integration das Wegsignal zu berechnen. Um trotzdem den Weg-Zeit-Verlauf bestimmen zu können, behilft man sich mit Nulllinien-Korrektur und mit Hochpass-Filterung. Allerdings muss man sich bewusst sein, dass damit auch wesentliche Signalanteile verloren gehen können.

Bild 3.4 zeigt als Beispiel die Schwingung auf dem Staudamm Emosson. Durch einfache Integration erhalten wir das Wegsignal, allerdings mit einem offensichtlichen Nulllinien-Fehler. Durch Filterung mittels 2-fachem Butterworth-Filter mit Eckfrequenz von 1 Hz ergibt sich ein plausibles Wegsignal.

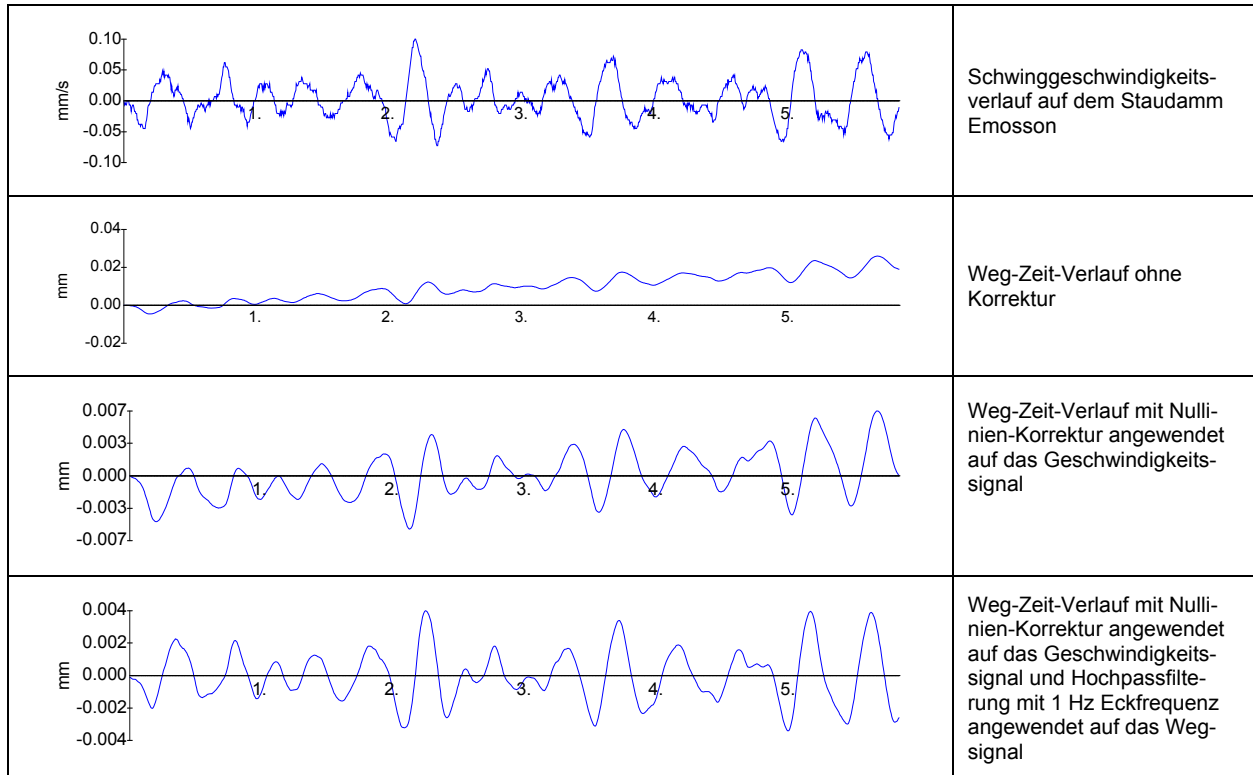


Bild 3.4 Berechnung des Weg-Zeit-Signals mit verschiedenen Korrekturen

3.2.3 Differentiation

Durch Differentiation des Geschwindigkeitssignals erhalten wir das Beschleunigungssignal. Bei tiefen und mittleren Frequenzen ergeben sich hier keinerlei Probleme, doch bereits bei Frequenzen, die höher als $1/5$ der Abtastrate liegen, können sich durch die Digitalisierung Unsicherheiten bei der Bestimmung der maximalen Beschleunigung ergeben. Durch Verwendung der La Grange-Methode werden für die Bestimmung der Beschleunigung nicht nur zwei benachbarte Punkte, sondern gleich mehrere Punkte mitberücksichtigt und dadurch die Berechnung der Beschleunigung (zumeist) verbessert. Trotzdem ist die Berechnung der Beschleunigung aus dem Geschwindigkeitssignal bei hohen Frequenzen mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Es empfiehlt sich deshalb, in solchen Fällen entweder mit höheren Abtastraten zu arbeiten oder direkt einen Beschleunigungssensor einzusetzen.

3.3 Auswertung im Frequenzbereich

Die Darstellung eines Erschütterungssignals im Frequenzbereich lässt uns Eigenschaften einer Schwingung und Zusammenhänge mit der sie ausführenden Tragstruktur erkennen, die wir aus dem Signal selbst (im Zeitbereich) niemals entnehmen könnten. Das wichtigste Verfahren bei der Auswertung im Frequenzbereich ist die Diskrete Fourier-Transformation (DFT). Die DFT hat eine solch grosse Bedeutung in der digitalen Signalverarbeitung erlangt, dass zumindest ein generelles Verständnis der Grundprinzipien von grossem Nutzen bei der Messdatenauswertung sein wird. Im Folgenden sollen diese Grundprinzipien möglichst anschaulich dargestellt werden, ohne stark auf mathematische Details einzugehen.

3.3.1 Die Diskrete Fourier Transformation (DFT)

Wir gehen aus von einer digitalisierten Schwingung, dargestellt als Zahlenreihe $x(n)$, mit n von 0 bis $N-1$. Wurde diese Schwingung mit einer Abtastrate von 400 Werten pro Sekunde während 0.3 Sekunden aufgenommen, so ergibt sich eine Zahlenreihe von 120 Werten, wie in Bild 3.5 dargestellt. Die Frequenz der Schwingung in Bild 3.5 beträgt 10 Hz.

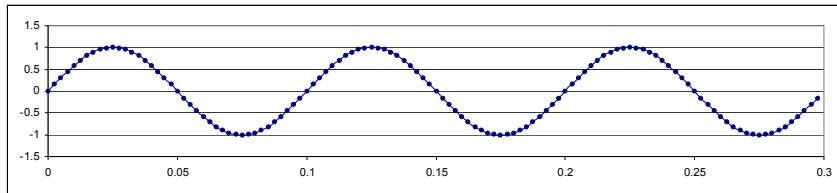


Bild 3.5 10-Hz-Sinusschwingung von 0.3 Sekunden Dauer, abgetastet mit 400 Werten pro Sekunde

Die DFT ist definiert als

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-i2\pi mn/N}$$

Wobei $X(m)$ den m -ten Fourier-Term darstellt. m ist der Index der Fourier-Termen. Er beginnt wie die Zahlenreihe ebenfalls bei 0 und geht bis $N-1$, d.h. es existieren N Fourier-Termen $X(0)$, $X(1)$, $X(2)$.. bis $X(N-1)$. Die Bedeutung der obenstehenden Gleichung für die DFT wollen wir, ohne auf mathematische Korrektheit zu achten, mit Hilfe von Bild 3.6 veranschaulichen.

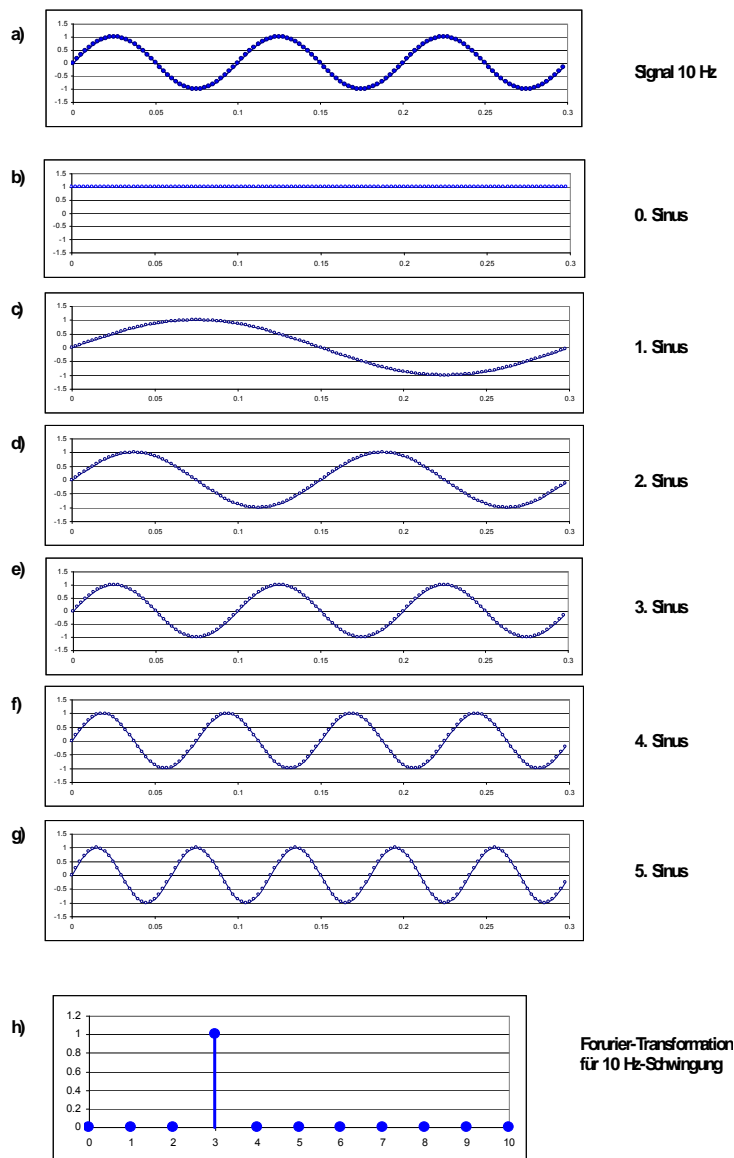


Bild 3.6 Veranschaulichung der Fourier-Transformation

Bild 3.6a zeigt die zu analysierende Schwingung. Sie hat eine Frequenz von 10 Hz und eine Dauer von 0.3 Sekunden. Bild 3.6b zeigt die Funktion, die wir benötigen, um den 0-ten Fourier-Term zu berechnen: es ist eine konstante Funktion mit der Amplitude 1.0. Die Multiplikation der

Zahlenwerte des Signals mit den entsprechenden Werten in der 0-ten Sinusfunktion und anschließenden Summation ergeben den 0-ten Fourierterm in Bild 3.6h. Die Multiplikation des Signals mit dem 1. Sinus ergibt den 1. Fourierterm u.s.w.

Eine genaue Betrachtung der Kurven zeigt, dass lediglich die Multiplikation des Signals mit dem 3. Sinus einen von Null verschiedenen Wert ergibt. Diese dritte Sinusfunktion hat 3 Schwingungen innerhalb von 0.3 Sekunden und hat somit 10 Hz. Dies bedeutet, dass der dritte Fourierterm 10 Hz darstellt und dass somit das untersuchte Signal eine Schwingung von 10 Hz aufweist.

Was können wir nun aus Bild 3.6 für die Frequenzanalyse von Erschütterungssignalen entnehmen:

- Der 0-te Fourierterm gibt nichts Weiteres an, als den Mittelwert des Signals; bei Nulllinienkorrigierten Signalen ist dieser Term natürlich gleich Null.
- Der 1. Fourierterm hat eine Schwingdauer von der Länge des Signals, d.h. die tiefste darstellbare Frequenz ist der Kehrwert der Signaldauer. Bei einer Signaldauer von 0.3 Sekunden ist die tiefste darstellbare Frequenz 3.33 Hz.
- Jeder höhere Fourierterm gibt ein Vielfaches der 1. Frequenz an. In unserem Beispiel entspricht der 1. Term 3.33 Hz, der 2. Term 6.67 der 3. Term 10 Hz usf.
- Die Frequenzintervalle sind gleich der Frequenz des 1. Terms und somit gleich dem Kehrwert der Signallänge. Wollen wir z.B. für eine sehr feine Frequenzanalyse ein Frequenzintervall von 0.1 Hz haben, so müssen wir eine Signallänge von mindestens 10 Sekunden verwenden.
- Der 3. Fourierterm, der sich aus der Multiplikation des Signals mit der 3. Sinusfunktion ergibt, enthält nichts anderes als das Integral des quadrierten Signals d.h. den Energieinhalt des Signals.

Bei der in der digitalen Signalanalyse verwendeten Fourier-Transformation handelt es sich stets um die sogenannte Fast-Fourier-Transformation, die – um die grosse Rechengeschwindigkeit erreichen zu können – immer voraussetzt, dass die Anzahl Werte im zu analysierenden Signal eine Potenz von 2 ist. Dies bedeutet, dass die Anzahl Werte 2, 4, 8, 16, 32 .. etc. ist. Für ein realistisches Signal von 2 Sekunden und mehr ergibt dies bei einer Abtastrate von 400/s folgende Signallängen:

| 2er-Potenz | Anzahl Werte | Signaldauer |
|------------|--------------|-------------|
| 2^{10} | 1024 | 2.56 s |
| 2^{11} | 2048 | 5.12 s |
| 2^{12} | 4096 | 10.24 s |
| 2^{13} | 8192 | 20.48 s |

Stimmt die Signallänge nicht mit der Zweierpotenz überein, so muss entweder abgeschnitten oder verlängert werden, wobei beim Verlängern die zusätzlichen Werte mit Nullen belegt werden. Das Auffüllen mit Nullen hat zwei wesentliche Vorteile gegenüber dem Abschneiden: Durch die künstliche Verlängerung des Signals wird das Frequenzintervall kleiner und damit die Aussage der Frequenzanalyse detaillierter. Im Gegensatz zum Abschneiden gehen beim Auffüllen keine Siganlabschnitte – die unter Umständen sehr wesentlich sind – verloren.

3.3.2 Darstellungen im Frequenzbereich

Die Darstellung des Amplitudenspektrums liegt – wie in Bild 3.6 dargestellt – primär als Amplitude pro Stützstelle vor. Das Unschöne daran ist, dass die Amplitudenwerte abhängig sind von der Anzahl Stützstellen pro Hz und diese Anzahl wird wiederum bestimmt durch die Länge des Signals. D.h. je nach Länge des Signals erhalten wir verschiedene Amplitudenwerte. Um die Amplitudenspektren zu vereinheitlichen wird deshalb häufig eine Darstellung in Form von mm/s pro Hz^{0.5} gewählt. Daneben existieren Darstellungen in Form von Terzbandspektren, wobei auch hier zu unterscheiden ist zwischen RMS-Terzbandspektren und Max-Hold-Terzbandspektren. Die Kenntnis dieser verschiedenen Darstellungsarten ist vor allem bei der Interpretation von Erschütterungsgrenzwerten von grösster Bedeutung.

Im Folgenden wollen wir versuchen die verschiedenen Darstellungsarten - zwar nicht unbedingt in mathematisch korrekter Form sondern mehr in anschaulicher Art - darzustellen. Wir verwenden dazu die vier Diagramme in Bild 3.7.

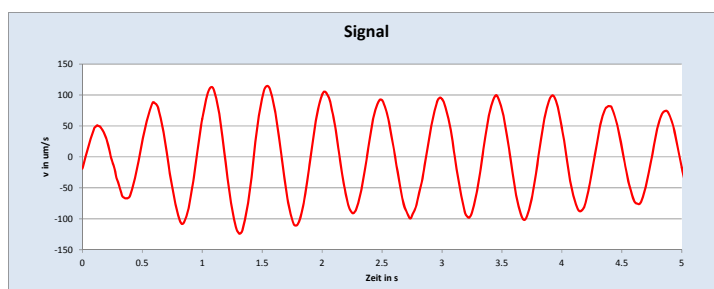


Bild 3.7a
Gemessenes Schwingungssignal

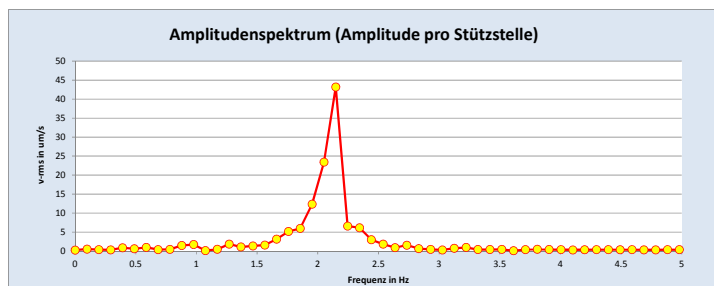


Bild 3.7b
Amplitudenspektrum mit Darstellung der v-rms-Amplitude pro Stützstelle

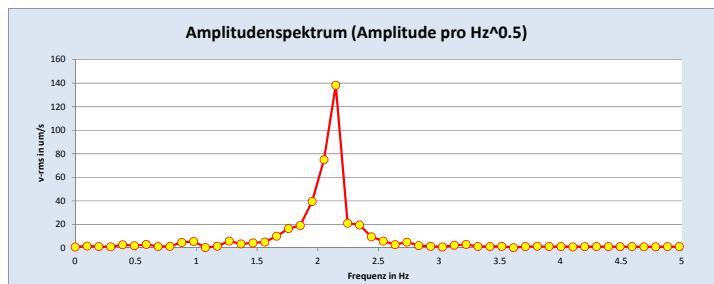


Bild 3.7c
Amplitudenspektrum mit Darstellung der v-rms-Amplitude pro Hz^{0.5}

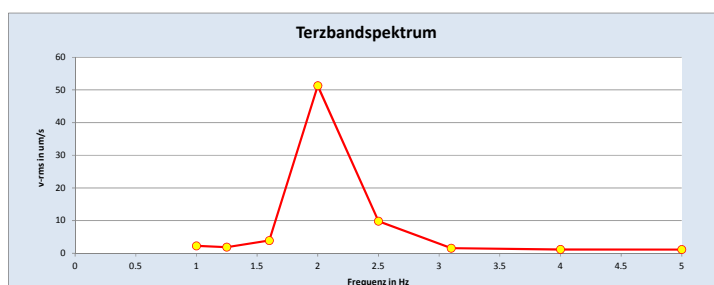


Bild 3.7d
Amplitudenspektrum mit Darstellung der v-rms-Amplitude pro Terzband

Bild 3.7a stellt das auf einem Kirchturm gemessene Schwinggeschwindigkeitssignal dar. Der Turm schwingt – angeregt durch den Wind – mit 200 µm/s regelmässig hin und her. Durch die Fourier-Transformation, wie wir sie in Bild 3.6 kennengelernt haben, erhalten wir die Amplitudenwerte pro Stützstelle. Und zwar sind es 10.24 Stützstellen pro Hz. Diese Zahl ist nicht ganz

zufällig identisch mit der Länge des analysierten Signals, denn der Kehrwert der Signallänge ergibt den Abstand zwischen den Stützstellen und dividieren wir den Abstand zwischen den Stützstellen durch 1 Hz erhalten wir die Anzahl Stützstellen pro Hz.

Zur Berechnung der Amplitude pro Hz $^{0.5}$ multiplizieren wir die Amplitude pro Stützstelle allerdings nicht mit der Anzahl Stützstellen sondern mit der Wurzel aus der Anzahl Stützstellen. In unserem Falle mit $10.24^{0.5}$. Dies lässt sich anschaulich folgendermassen erklären: Die Darstellung Amplitude pro Hz entspricht ja einer Summation aller Amplituden pro Stützstellen in diesem 1-Hz-Intervall. Da diese Amplituden jedoch nie gleichzeitig das Maximum erreichen, dürfen sie nicht einfach addiert werden sondern müssen nach der RSS-Methode addiert werden, d.h. die Werte werden quadriert, dann summiert und schliesslich nimmt man die Wurzel davon. Dadurch entsteht auch die etwas seltsam anmutende Definition [v-rms pro Hz $^{0.5}$], die man häufig bei den Grenzwert-Definitionen findet.

Bei der Darstellung als Terzbandspektrum werden die spektralen Beiträge (d.h. Amplituden pro Stützstelle) zusammengefasst in Terzbänder. Die Frequenzachse wird aufgeteilt in Drittel-Oktavbänder. Oktavbänder sind eine relativ grobe Einteilung bei der die Frequenzbänder 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz, 8 Hz, 16 Hz usw. verwendet werden. Bei den Terzbändern geht man etwas feiner vor und verwendet die Bänder 1 Hz, 1.25 Hz, 1.6 Hz, 2.0 Hz, 2.5 Hz usw. d.h. die Oktavbänder werden nochmals gedrittelt, wie in Bild 3.8 dargestellt.

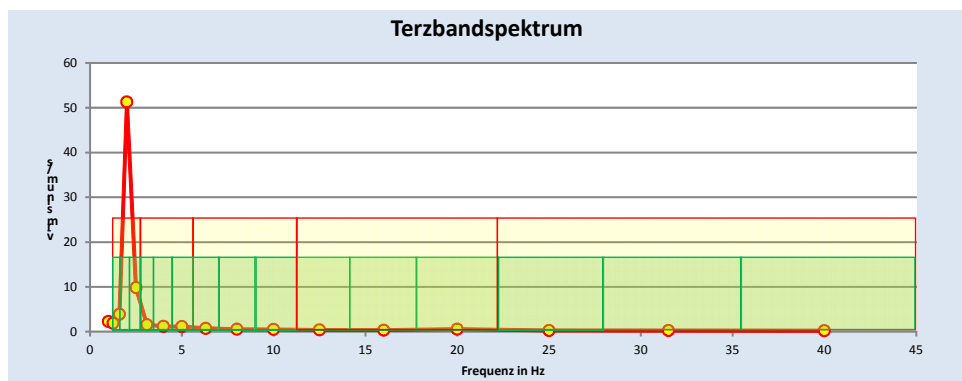


Bild 3.8
 Octav- und Terzbänder

Die Beiträge für die einzelnen Terzbänder werden durch Summation aller Amplituden pro Stützstellen in den einzelnen Terzbändern ermittelt, d.h. die Werte innerhalb eines jeweiligen Terzbandes werden nach der RSS-Methode addiert.

Da alle diese Darstellungen auf der Fourier-Transformation basieren und da die Fourier-Transformation den RMS-Wert gemittelt über das gesamte Signal darstellt, sind auch die davon abgeleiteten Terzband-Darstellungen Mittelungen über das gesamte Signal. Dies mag für gleichmässige Erschütterungen adäquat sein. Bei impulsartigen Erschütterungen sind solche Darstellungen nicht ausreichend.

Um den Effekt von einzelnen starken Erschütterungen aufzeigen zu können, sind sog. Max-Hold-Terzbandspektren zu verwenden. Bei dieser Darstellung wird für jedes Terzband der stärkste je auftretende Ausschlag wiedergegeben. Der Unterschied zwischen dem Mittelwert- und dem Max-Hold-Terzbandspektrum kann, wie das Beispiel von Bild 3.9 zeigt, sehr beträchtlich sein.

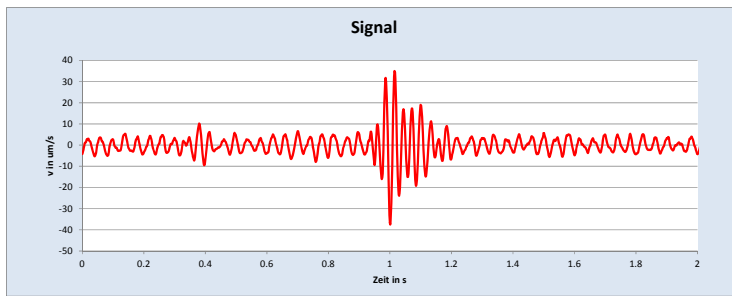


Bild 3.9a
Gemessenes Schwingungssignal

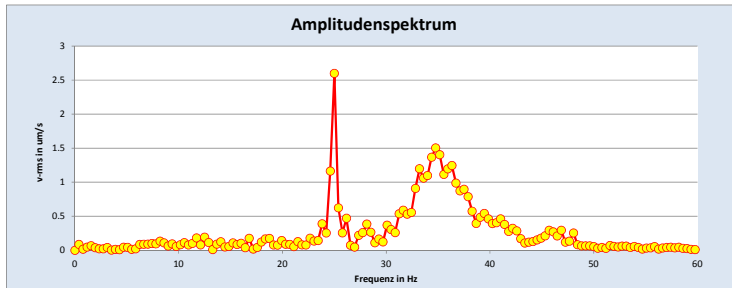


Bild 3.9b
Amplitudenspektrum mit Darstellung der v_{rms} -Amplitude pro Stützstelle

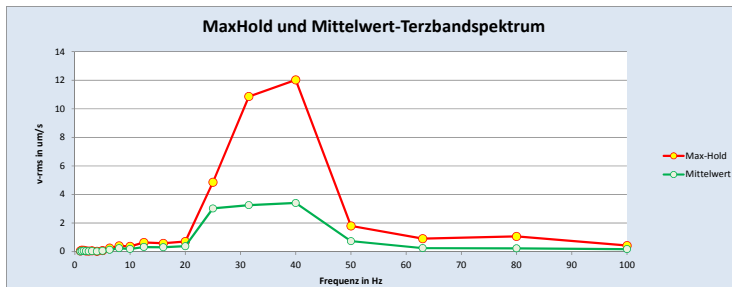


Bild 3.9c
Max-Hold- und Mittelwert-Terzbandspektrum

4 Anwendungen

Nach diesen eher theorie-lastigen Ausführungen sollen nun acht Anwendungsbereiche im Bauwesen dargestellt werden. Es soll aufgezeigt werden, welche Sensoren sinnvollerweise eingesetzt werden und welche Probleme bei solchen Messungen auftauchen können.

Baustellenüberwachung

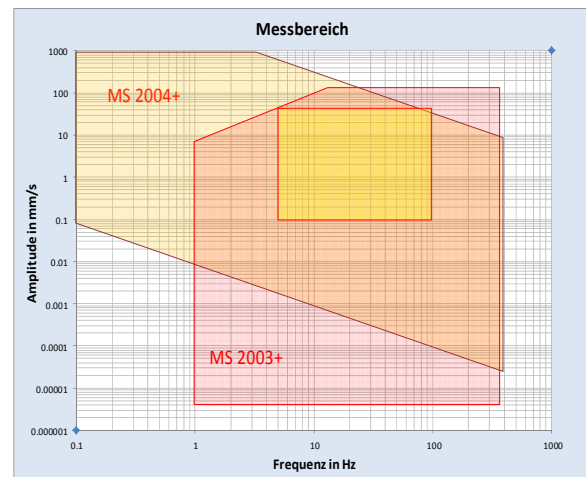
Problemstellung

Überwachung von Baustellenerschütterungen (z.B. Rammen, Vibrieren, Sprengen) an mehreren Messpunkten während einer längeren Zeitperiode zum Schutze der umliegenden Objekte (inkl. Alarmierung und Datenfernübertragung).

Generelles Vorgehen:

1. Abschätzung des betroffenen Bereichs
2. Definition der kritischen Objekte
3. Festlegen der Grenzwerte
4. Definition der zu überwachenden Objekte
5. Orientierung der Bewohner
6. Erstellen des Alarmkonzepts
7. Installation der Mess-Stationen
8. Testphase
9. Bauphase (= Messphase)
10. Schlussbericht

Messbereich



Messung

In der Regel Messung mit Geschwindigkeitssensoren, Registrierung von stärkeren Ereignissen, Aufzeichnung eines Pegelschriebs während der gesamten Ueberwachungsdauer.

Triggerwerte für Normalfall:

- 1 mm/s: Event-Aufzeichnung
- 2 mm/s: Low-Level-Alarm (als Orientierung)
- 4 mm/s: High-Level-Alarm (als Alarm)

Fernbedienung, Alarmierung und Daten-Download via GSM oder GPRS.

Auswertung

In der Schweiz zumeist nach SN 640 312a

Richtwerte:

| Frequenzbereich: | Permanent (>> 100 000) | | | Häufig | | | Gelegentlich (<< 1000) | | |
|------------------------|------------------------|---------|------|--------|---------|------|------------------------|---------|------|
| | < 30 | 30 - 60 | > 60 | < 30 | 30 - 60 | > 60 | < 30 | 30 - 60 | > 60 |
| Sehr wenig empfindlich | 9 | 12 | 18 | 18 | 24 | 36 | 45 | 60 | 90 |
| Wenig empfindlich | 6 | 8 | 12 | 12 | 16 | 24 | 30 | 40 | 60 |
| Normal empfindlich | 3 | 4 | 6 | 6 | 8 | 12 | 15 | 20 | 30 |
| Erhöht empfindlich | 1.5 | 2 | 3 | 3 | 4 | 6 | 8 | 10 | 15 |

Tücken

Alarmierung: Immer wieder sind die zu alarmierenden Personen nicht erreichbar. Hier hilft nur ein von allen Seiten abgesegneter Alarmierungsplan mit exakter Definition der Verantwortlichkeiten und klarer Regelung der Stellvertretungen.

Stromversorgung: In 99 % der Fälle ist eine zuverlässige Stromversorgung vorhanden. Das Problem ist vielmehr, dass immer wieder das Stromkabel ausgesteckt wird. Durch Programmieren von Alarmmeldungen bei Verlust der Stromversorgung lässt sich dieses Problem leicht lösen.

Mobilfunknetz: In der Regel ist der Netzempfang ausreichend. Für Standorte ohne Netzempfang wie Kavernen oder abgeschirmte Bereiche lässt sich das Problem mit Ethernet-Leitungen, mit SDSL-Verbindungen oder Powerline-Verbindungen lösen.

Beispiel



Gleisschlag Giesshübelstasse, Zürich

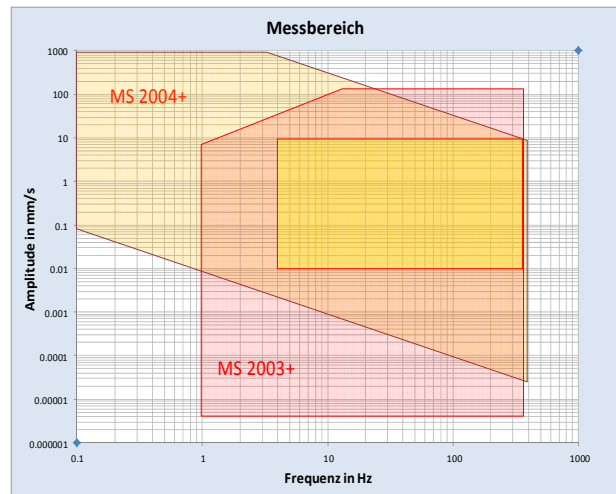
Eisenbahnerschütterungen

Problemstellung

Neben der Trasse einer bestehenden Eisenbahnlinie oder über einem Eisenbahntunnel sollen neue Wohnhäuser entstehen. Bei Distanzen von weniger als 50 m sollten die Immissionen näher untersucht werden. Denn durch die von der Eisenbahn erzeugten Vibrationen können Schwingungen über das Erdreich in das Gebäude gelangen und zu Erschütterungen und zu störendem abgestrahlten Schall (sog. Körperschall) führen. Mit Hilfe von Messungen und Berechnungen kann abgeklärt werden, ob diese Vibrationen zu störenden Immissionen führen können.

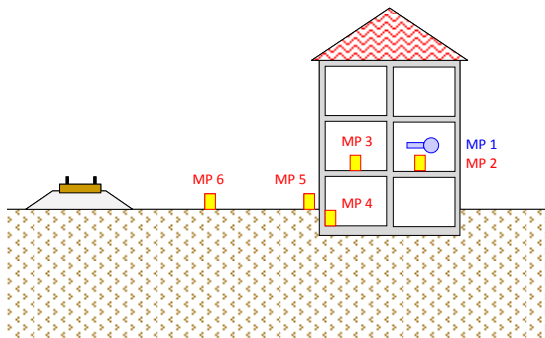
Das gleiche Problem stellt sich natürlich auch im umgekehrten Fall, d.h. wenn neben bestehenden Wohngebäude neue Gleisanlagen entstehen oder bestehende modifiziert werden.

Messbereich



Messung

Für diese Messung eignen sich Geschwindigkeitssensoren. Mit 5 vertikalen Geschwindigkeitsmesspunkten und einem Schallmesspunkt lassen sich in der Regel alle relevanten Informationen gewinnen.



Auswertung

In der Schweiz erfolgt die Auswertung in der Regel nach BEKS und nach DIN 4150/2. Bei Messungen in bestehenden Gebäuden und bestehender Eisenbahnlinie lässt sich so bestimmen, ob die Anhaltswerte eingehalten werden.

Für projektierte Gebäude lässt sich aufgrund der Frei-Feld-Messung (MP 6) und mit Hilfe der verschiedenen Transferspektren zwischen Frei-Feld und Wohnzimmer eine einigermaßen zuverlässige Prognose erstellen.

Für projektierte Gleisanlagen lässt sich mit dem gleichen Verfahren „berechnen“, ob Massnahmen zur Reduktion der Erschütterungen and der Gleisanlage erforderlich sind.

Tücken

Triggersensor: Messungen in bewohnten Gebäuden werden immer wieder durch die Aktivitäten der Bewohner gestört. Eine einfache Abhilfe bietet ein Triggersensor in Gleisnähe (MP 6), sodass nur gemessen wird, wenn ein Zug fährt.

Messpunkte: Für eine sinnvolle Prognose müssen die Messpunkte korrekt ausgewählt werden. Ein Messpunkt in Deckenmitte darf z.B. nicht über einer Zwischenwand liegen. Idealerweise misst man einige Zugdurchfahrten und überprüft die gemessenen Signale auf Plausibilität.

Repräsentative Daten: Zugserschütterungen weisen sehr grosse Streuungen auf. Bei gemischtem Verkehr liegt der COV bei 0.6. Deshalb sollten genügend Zugdurchfahrten erfasst werden.

Beispiel



Frei-Feld-Messung Projekt „lfangstrasse / Rümlang“

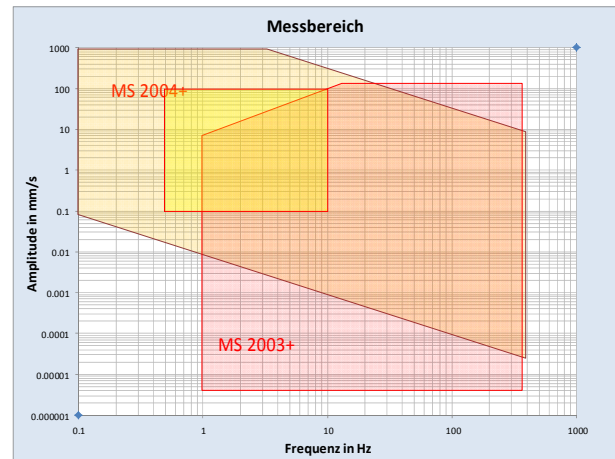
Fussgängerbrücken

Problemstellung

Das Verhältnis zwischen Eigengewicht und Nutzlast bringt es mit sich, dass die meisten Fussgängerbrücken etwas „lebhaft“ sind. Oft werden Fussgängerbrücken mit der Option „Schwingungstilger“ gebaut. D.h. die Brücke wird mit einer Aussparung für den Schwingungstilger erstellt, doch wird der Entscheidung, ob ein Tilger eingebaut wird oder nicht, von einer Messung vor Inbetriebnahme abhängig gemacht.

Mit einer solchen Messung ist das Schwingverhalten der Fussgängerbrücke in allen relevanten Belastungszuständen zu prüfen. Neben der Bestimmung der Eigenfrequenzen sind die Schwingungen bei unterschiedlicher Nutzung der Brücke zu messen.

Messbereich



Messung

Für diese Messungen sind Beschleunigungssensoren einzusetzen. Die tiefen Frequenzen und die grossen Wegamplituden liegen ausserhalb des Bereichs für Geschwindigkeitssensoren.

Üblicherweise umfasst das Messprogramm folgende Anregungsarten:

- Harmonische Anregung durch Erreger
- Hintergrund-Anregung (ambient vibration)
- Anregung durch Personen

Bei der Anregung durch Personen sind verschiedene Belastungszustände zu messen:

- Normales Gehen von 2, 4 und 10 Personen
- Rennen im Takt von 2, 4 und 10 Personen
- Mutwillige Anregung durch Personen

Je nach Personenaufkommen sind auch Messungen mit grösseren Personenzahlen durchzuführen.

Auswertung

Die Messungen erlauben die Überprüfung des FE-Modelles und die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit. Im „Leitfaden für die Bemessung von Fussgängerbrücken“ von HIVOSS (Human Induced Vibrations of Steel Structures) werden folgende Angaben gemacht:

| Komfortklasse | Grad des Komforts | Vertikal (m/s ²) | Seitlich (m/s ²) |
|---------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|
| CL 1 | Maximum | < 0,50 | < 0,10 |
| CL 2 | Mittel | 0,50 – 1,00 | 0,10 – 0,30 |
| CL 3 | Minimum | 1,00 – 2,50 | 0,30 – 0,80 |
| CL 4 | Nicht akzeptabel | > 2,50 | > 0,80 |

Tücken

Bestimmung der Eigenfrequenz: Sollen mit der „Ambient vibration“-Messung nicht nur die erste sondern auch die höheren Eigenfrequenzen bestimmt werden, so darf der Sensor nicht exakt in Brückenmitte aufgestellt werden.

Lokale Effekte: Durch das Aufprallen der Schuhe können – insbesondere bei Holzbelägen - lokal sehr hohe Beschleunigungen entstehen, die nichts mit der Brückenschwingung zu tun haben. Die gemessenen Signale sollten deshalb mit einem 10-Hz-Tiefpassfilter korrigiert werden, um diese Effekte zu eliminieren.

Beispiel



Fussgängerbrücke bei Cevio TI

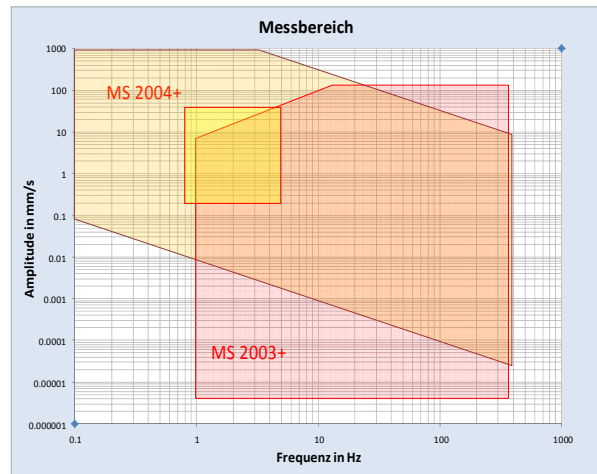
Kirchtürme

Problemstellung

Kirchtürme sind oft schlanke Bauwerke, die durch die Glocken in übermässige Schwingungen versetzt werden. Probleme können z.B. auftauchen, wenn eine zusätzliche Glocke eingebaut werden soll. Dann muss sichergestellt werden, dass die neue Glocke keine Resonanzschwingungen verursacht.

In manchen Fällen treten die starken Schwingungen seit Jahren auf und nun sollen - im Zuge einer ohnehin nötigen Sanierung - diese Schwingungen reduziert werden. Zum Teil geht es nicht primär um die von der Glockenmasse erzeugte Turmschwingung sondern um die vom Klöppelschlag erzeugte impulsartige Erschütterungen. Auch diese können Schäden verursachen.

Messbereich



Messung

Für diese Messungen sind in der Regel Beschleunigungssensoren einzusetzen. Die zum Teil recht grossen Wegamplituden der Turmschwingungen erfordern Beschleunigungssensoren. Für die Untersuchung des Klöppelschlags sind auch Geschwindigkeitssensoren geeignet.

Üblicherweise umfasst das Messprogramm folgende Anregungsarten:

- Bestimmung der Eigenfrequenz mittels Messung der Schwingung bei Hintergrund-Anregung (ambient vibration)
- Messung beim Läuten jeder Glocke einzeln
- Messung beim Läuten aller Glocken

Zu messen ist in der Regel im Turm auf der Höhe des Glockenstuhls

Auswertung

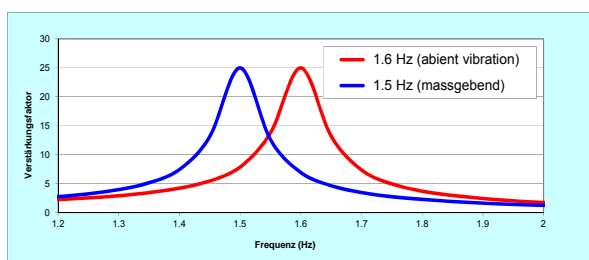
Die Turm-Eigenfrequenz muss für die Abstimmung der Glocken sehr genau bekannt sein. Oft ist eine Genauigkeit von 0.02 Hz erforderlich. Um diese Genauigkeit zu erreichen sind Messungen mit entsprechend langen Aufzeichnungen vorzunehmen.

Die DIN 4178 gibt folgende Orientierungswerte für maximale Turmschwingungen an:

| Bauart | v_{max} in mm/s |
|------------------------------|-------------------|
| Historische Türme, allgemein | 3 |
| Historische Holztürme | 5 |
| Türme aus Ingenieurmauerwerk | 5 |
| Türme aus Ingenieurholzbau | 8 |
| Türme aus Stahlbeton | 8 |
| Stahltürme | 10 |

Tücken

Bei geringen Verformungen, wie z.B. bei der „ambient vibration“-Messung, ergeben sich höhere Eigenfrequenzen als bei einer Messung bei starkem Wind oder beim Schwingen der Glocken. Die massgebende Eigenfrequenz eines Kirchturmes ist jedoch die Eigenfrequenz beim Schwingen der Glocken. Und diese kann einiges tiefer liegen als die mit „ambient vibration“ gemessene. Das Vernachlässigen dieses Effektes kann zu unerwünschten Ergebnissen führen.



Beispiel



Kirche Zürich - Altstetten

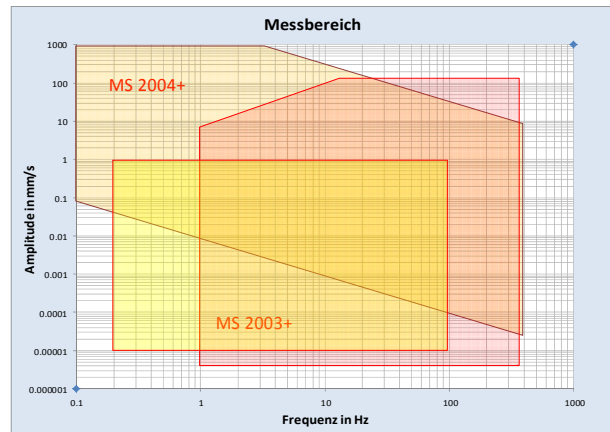
Hochempfindliche Anlagen

Problemstellung

Die Standortwahl für Labors der Nanotechnologie, für Magnet-Resonanz-Imaging (RMI) oder für Rasterelektronenmikroskope aber auch die Positionierung von Maschinen für die Präzisionsfertigung erfordern Erschütterungsmessungen mit extrem hoher Auflösung.

Eine zusätzliche Herausforderung ist die Interpretation der unterschiedlichen Grenzwertformulierungen der Maschinenhersteller. Sehr oft ist es Aufgabe des mit der Messaufgabe betrauten Ingenieurs „brauchbare“ Formulierungen der zulässigen Erschütterungen beim Hersteller der empfindlichen Geräte einzufordern.

Messbereich



Messung

Schwinggeschwindigkeitssensoren erlauben gerade im tieferen Frequenzbereich eine wesentlich bessere Auflösung als Beschleunigungssensoren. Sie sind jedoch bei 1 Hz limitiert. Beschleunigungssensoren können zwar Frequenzen unter 1 Hz messen, weisen aber gerade in diesem Frequenzbereich eine um 3 bis 4 Dekaden schlechtere Auflösung auf und sind deshalb nicht unbedingt eine geeignete Alternative.

Üblicherweise dauert eine Messung 24 h bis mehrere Tage und umfasst Folgendes:

- Registrierung der Maxima für jede Minute während der gesamten Messdauer
- Signalaufzeichnung von 60 Sekunden alle 15 Minuten
- Eventaufzeichnung bei Überschreiten eines definierten Wertes (Triggerwert)

Zu messen ist in der Regel in Fussbodenmitte oder am Standort an dem die empfindliche Anlage positioniert werden soll.

Auswertung

Die Auswertung erfolgt nach der Definition der gegebenen Grenzwerte. Häufig sind die Grenzwerte für Terzbänder angegeben. Dabei ist zu beachten, dass die Grenzwerte als RMS-Werte oder als Max-Hold-Werte definiert sein können.

Als Richtgrösse mag die von Rosenquist (Symposium 2008) adaptierte Tabelle helfen:

| Anwendung | v-terz (rms) |
|-----------------------------|----------------------|
| ISO Werkstatt | 800 $\mu\text{m/s}$ |
| ISO Büro | 400 $\mu\text{m/s}$ |
| ISO Wohngebäude | 200 $\mu\text{m/s}$ |
| ISO Operationssaal | 100 $\mu\text{m/s}$ |
| VC-A Mikrowaagen | 50 $\mu\text{m/s}$ |
| VC-B optische Mikroskope | 25 $\mu\text{m/s}$ |
| VC-C lithographische Geräte | 12,5 $\mu\text{m/s}$ |
| VC-D Elektronenmikroskope | 6 $\mu\text{m/s}$ |
| VC-E Höchstsensible Systeme | 3 $\mu\text{m/s}$ |

Tücken

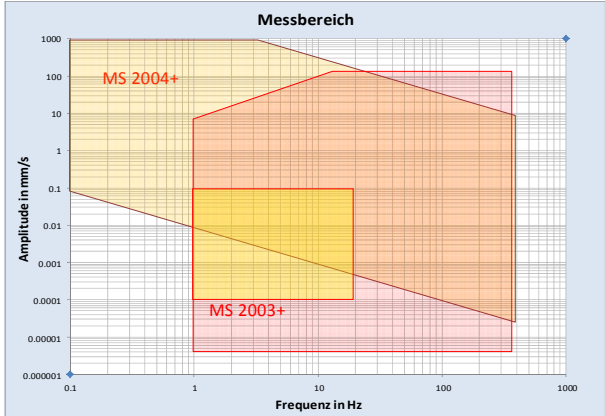
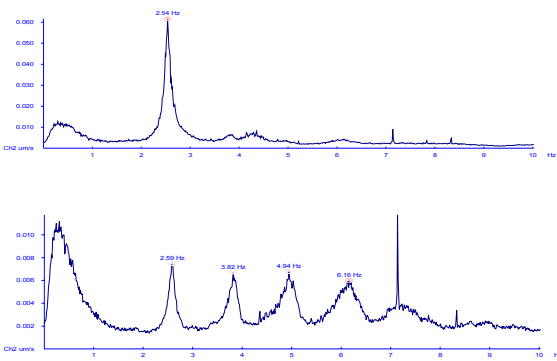

Datenmenge: Langzeit-Messungen für empfindliche Anlagen produzieren enorme Datenmengen. Hier ist die Verwendung geeigneter Auswertesoftware und des gesunden Menschenverstandes äusserst wichtig.

Identifikation von Störquellen: Da wir uns im „nicht fühlbaren“ Bereich befinden, kann die Identifikation der Störquellen bisweilen sehr schwierig sein. Die Protokollierung (mit exakter Zeitangabe) aller Aktivitäten im Umfeld des zu untersuchenden Standortes ist äusserst wichtig. Beispiele: Eisenbahndurchfahrten, Lastwagendurchfahrten, Kranbahnbetrieb, Liftbenutzung u.ä.

Beispiel



„Noise-free“ Lab (IBM-Rüschlikon)

| Staumauern | |
|--|--|
| <p>Problemstellung</p> <p>Bei der seismischen Berechnung einer Staumauer wird die Eigenfrequenz mit Hilfe eines FE-Modelles ermittelt. Bei der seismischen Requalifikation wird die Eigenfrequenz zusätzlich durch Messungen ermittelt. Die durch Messung am bestehenden Damm ermittelten Eigenfrequenzen und Eigenformen werden anschliessend verwendet um die vorhandenen FE-Modelle zu optimieren.</p> | <p>Messbereich</p>  |
| <p>Messung</p> <p>Für diese Messaufgabe sind Geschwindigkeitssensoren bestens geeignet. Sie ermöglichen eine hohe Auflösung im tiefen Frequenzbereich, sodass die Eigenfrequenzbestimmung ohne aufwändige Fremdanregung sondern allein durch Messung der Hintergrunderschütterung (ambient vibration) möglich ist.</p> <p>Eine genügende Anzahl Horizontalsensoren werden über die Mauerkrone und - falls möglich - in einem Vertikalschacht in der Mitte des Damms verteilt. 12 Sensoren sollten für eine grössere Bogenstaumauer durchaus genügen.</p> <p>Die Messung kann als Dauermessung durchgeführt werden. In der Regel genügt eine Messung von 60 Minuten um die ersten 3 Eigenfrequenzen mit höchster Präzision zu bestimmen.</p> | <p>Auswertung</p> <p>Die Bestimmung der Eigenfrequenzen erfolgt am besten durch Überlagerung der Amplitudenspektren (frequency enhancement).</p>  <p>Aus 100 Aufzeichnungen à 60 Sekunden Dauer gemittelte Amplitudenspektren: oben: Mitte Dammkronen; unten : 1/5-Punkt der Dammkrone</p> |
| <p>Tücken</p> <p><i>Signallänge:</i> Die Länge der Signale bestimmt die Auflösung bei Amplitudenspektrum und damit auch die Genauigkeit bei der Bestimmung der Eigenfrequenzen. Die Signallänge sollte deshalb mindestens 60 Sekunden betragen.</p> <p><i>Wahl der Messpunkte:</i> Der Messpunkt in der Mitte der Mauerkrone erlaubt zwar die beste Bestimmung der 1. Eigenfrequenz, für die höheren Eigenfrequenzen wird er aber kaum brauchbare Informationen liefern.</p> <p><i>Störfrequenzen:</i> Turbinen und Generatoren erzeugen ebenfalls Frequenzspitzen. Diese treten im Amplitudenspektrum als „Nadeln“ in Erscheinung während die Eigenfrequenzen der Staumauer als „Berge“ auftauchen.</p> | <p>Beispiel</p>  <p>Staudamm Moiry VS</p> |